

鸭嘴阀扩散器卷吸特性研究

高 柱¹ 唐洪武¹ 李行伟²

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098 2. 香港大学土木工程系, 香港)

摘要 对同向流动环境中的水平 DBV 射流的掺混特性进行了一系列试验研究, 对不同试验组次下的时均速度分量、射流边界、射流动量、紊动强度、雷诺应力和射流卷吸参量做了研究. 研究结果表明: 按时均中心线流速衰减规律, 可将流动划分为 3 个区域, 每个区域有其自身特定的指数衰减率; 当 $x/D > 1.5$, 除主轴平面内的紊动应力以外, 时均速度、紊动强度、雷诺应力出现自相似; 轴变换发生在 $x/D = 1 \sim 1.5$ 附近; 平均稀释度和无量纲的沿程距离之间存在线性关系. 相比于具有相同名义直径的同向流动环境中的圆射流, 在相同排放流量条件下, DBV 射流具有更好的稀释效果.

关键词 紊动射流 激光多普勒流速仪 鸭嘴阀 卷吸

中图分类号: TV131.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1980(2005)06-0646-04

鸭嘴形状的弹性橡胶止回阀, 简称鸭嘴阀 (DBV, duckbill valve), 因其能有效地阻止环境水体的回流和入侵, 并具有独特的水力排放特性, 已经在很多污水对海排放扩散器和雨洪排放系统中使用. 但是, 鸭嘴阀水力特性的系统理论研究相对滞后. 自 20 世纪 90 年代中期起, 人们开始研究以寻找无量纲量描述的 DBV 阀在不同排放条件下的水力排放特性. Lee 等^[1, 2]首先完成了对 DBV 射流的研究, 他们在以往试验数据的基础上, 推导出无量纲的水头与排放流量的关系式, 并编制成计算程序, 能针对不同尺寸和不同材料的鸭嘴阀, 预测出喷口排放流量的变化和扩散器的沿程流速分布. 唐洪武等^[3]采用 ADV 流速仪对同向流动环境中的 DBV 射流场的掺混特性做了研究, 发现在 12 倍名义直径区域内, DBV 射流紊动强度要明显高于圆射流, 主次轴扩展率显著不同, 并出现了“轴变换”现象, 在这个区域以外, 射流扩展特性与圆射流类似. 在数值模拟方面, Lee 等^①将有伴随流动的 DBV 阀概化成矩形口射流, 为模拟 DBV 喷口处产生的二次流, 在喷口内边界条件上施加了指向内侧的速度. 数值模拟结果与文献 [3] 的试验结果相近. 在相同的排放条件下, DBV 射流稀释效果要明显优于圆射流. 本文在上述研究的基础上, 运用 LDV 对同向流动环境中的 DBV 射流的掺混特性、中心线流速衰减、紊动强度、紊动应力做进一步研究, 并探讨了轴变换发生的位置和射流沿程稀释度, 通过实测数据证实了 Lee 等^①有关 DBV 射流稀释效果要明显优于圆射流的数值模拟结论.

1 试验布置和实施

在 $10\text{ m} \times 0.3\text{ m} \times 0.45\text{ m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高) 的循环水槽里进行 DBV 射流水力特性试验研究. DBV 的入口端套接在直径 $D = 2\text{ cm}$ 的圆形喷口上, 并用夹子固定. 如图 1 所示, DBV 射流沿 x 方向射入速度大小为 U_a 的同向流动环境水体中. 射流体速度采用 LDV (Laser-Doppler Velocimetry) 量测, 同向流动环境水体的速度由置于喷口上游的微型旋桨流速仪测量. 每次试验在水槽的中心部分完成. DBV 入口流量由标准旋转流量计测量. 表 1 概括了 DBV 射流试验运行参数. 激光片光由氩离子激光器产生, 试验中, 将名义直径为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的适中浮力多晶粉末播撒到水流中, 片光照射到垂直于射流中心线的测量区域上, 在主轴

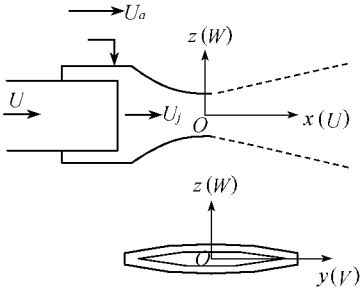


图 1 鸭嘴阀流动坐标系
Fig.1 Coordinate for DBV jet

收稿日期: 2004-04-01
基金项目: 香港资助委员会和香港大学资助项目 (RGC HKU 7008/97E)
作者简介: 高柱 (1978—), 男, 湖北宜昌人, 博士研究生, 主要从事水力学及河流动力学研究.
① LEE J H W, KUANG C P, CHAN H C. The velocity field of a duckbill valve (DBV) jet in coflow. Proceedings of the 15th ASCE Engineering Mechanics Congress, New York, 2002.

平面(xOy 平面)和次轴平面(xOz 平面)内形成 LDV 测量断面 ,纵向测量范围 0.1 ~ 20 个名义管径 D ,单点测量持续时间 1 min. 在主次轴平面内分别同时量测速度分量 U 和 V ,相应的紊动强度、雷诺应力、偏斜因子和平滑因子也一并获得 .运用数字图像处理技术确定阀的出口面积 ,水下摄影机拍摄出口图片 ,DT3155 数字图像卡捕捉图像 ,由数字图像后处理软件(Global Lab Image)获得断面特征信息 .

表 1 同向流动中 DBV 射流试验参数

Table 1 Experimental parameters for a DBV coflow jet								
组次	流量 $Q/$ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	射流最大速度 $U_j/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	环境速度 $U_a/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	射流比 U_j/U_a	出口面积 A/mm^2	出口平均速度 $U_0/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	出口处动量 $M_{e0}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2})$	无量纲沿程 距离 x/D
1	0.035	2.28	0.10	24	5.5	1.77	2.12×10^{-5}	0.1 ~ 20
2	0.098	3.69	0.10	38	7.9	3.45	9.78×10^{-5}	0.1 ~ 20
3	0.155	4.16	0.10	43	12.1	3.56	1.75×10^{-4}	0.1 ~ 20
4	0.340	5.75	0.10	60	17.1	5.52	5.34×10^{-4}	0.1 ~ 20

2 试验结果分析

2.1 轴线超值流速 U_m 衰减

DBV 射流可以描述成喷口形状随流量变化的、具有较大高宽比的矩形射流 ,其射流场通常可以依据轴线流速作出区域划分^[4~6] .根据 DBV 射流场的实测资料 ,由时均轴线超值流速 U_m ($U_m = u_m - U_a$, u_m 为射流流场内轴线上某点的实际流速值)的衰减特性将射流场划分为 3 个区域 ,分别为核心区(OA)、特征区(AB)、充分发展区域(BC) ,如图 2 所示 .核心区的流速与喷口处流速保持一致 ,没有衰减 ;特征区内 , U_m 的衰减正比于 x^n ;在充分发展区 , U_m 的衰减正比于 x^m .由试验求得 m 约为 - 1 , n 约为 - 1/3 .

2.2 速度断面和脉动统计量

图 3 为各工况下射流不同断面的超值流速径向分布 .超值流速 U ($U = u - U_a$, u 为射流流场内某点的实际流速值)用最大轴线超值流速 U_m 无量纲化 ,同时径向距离 y , z (当不区分 y 和 z 的方向时 ,可以用 r 表示 y 和 z 的大小)用特征半宽度 b_{gy} 和 b_{gz} 分别无量纲化(b_{gy} 特征射流半宽度 ,表示为射流横断面上的超值流速等于 U_m/e 处的径向坐标 ; b_{gy} 与 b_{gz} 分别为水平剖面 and 纵剖面内的特征射流半宽度) , B 为测量中心偏移量 .试验结果显示 ,当 $x/D > 1.5$ 时 ,射流主次轴平面的流速分布呈现出很好的相似性 ,试验点均落在同一条曲线上 ,可用 Gaussian 曲线分布来描述 ,并且次轴相似发生的位置总是早于主轴相似发生的位置 ,发生的原因是混合层在次轴平面内先渗透了核心区 ,更早的掺混导致了自相似的更早出现 .同时笔者研究了紊动强度 U_{rms}/U_m , $U_{rms} = \sqrt{u'^2}$ 为脉动速度均方根 ,当 $x/D > 1.5$,试验数据点具有偏离中心的双峰形曲线分布 ,在 $|r/b| < 0.9$ 内 ,紊动强度变化范围区间为 0.05 ~ 0.25 .与 DBV 射流浓度断面相比^[8] ,紊动强度沿程变化不大 ,这说明速度断面的自相似状态要比浓度断面的自相似状态更早达到 .在同样装置下所获得的圆射流的紊动强度分布区间为 0.15 ~ 0.23 ,峰值略低于鸭嘴阀^[7] .值得注意的是 ,文献 [3] 中当 $x/D < 12.5$ 时 ,DBV 射流紊动强度明显大于圆射流 ,这与本文结果不同 .产生差异的最主要的原因是射流比不同 .文献 [3] 中射流比最大不超过 20 ,而本文的最小射流比为 24 .因此可以认为 ,射流水体出口平均流速与同向环境水流速度之比的大小对 DBV 同向射流各种掺混特性有较明显的影响 .笔者还对下游不同位置 XY 与 XZ 平面内的紊动应力进行了无量纲化 ,得到 $u'v'/U_m^2$ 和 $u'w'/U_m^2$ 的断面分布 .次轴平面内不同断面的紊动应力具有相同形状的曲线分布 ,在 $|r/b| = 0.7 \sim 0.8$ 内 ,紊动应力强度峰值变化范围为 0.015 ~ 0.02 ,说明应力的分布已经在次轴平面内获得 ,而主轴平面内的应力分布仍然处于调整状态 ,其相似状态的获得可能需要在喷口下游更远的地方才会发生 .

2.3 射流厚度

图 4 所示为主次轴平面内的射流宽度增长率 .在主次轴平面内 ,射流宽度增长率明显不同 ,并导致轴变

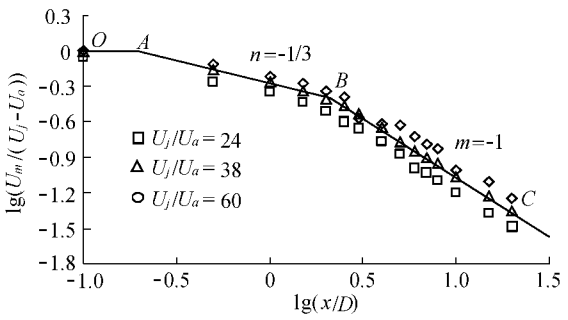


图 2 中心线轴线速度衰减特征

Fig.2 Decay characteristics of axial velocity along centerline

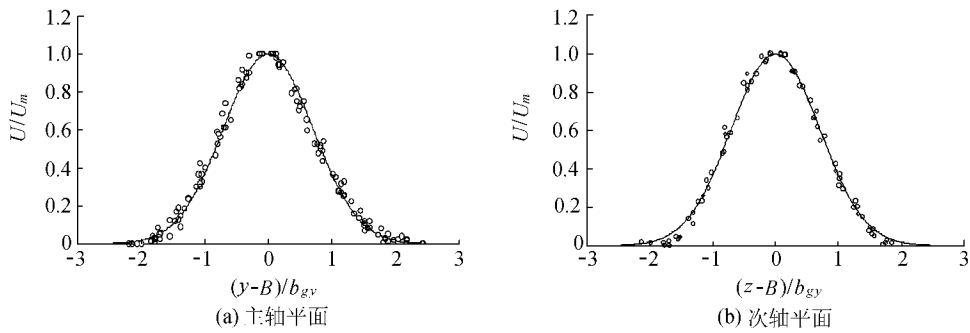


图 3 超值流速 U 沿径向的分布

Fig.3 Transverse distributions of excess axial velocity

换现象.轴变换发生的范围为 $1x/D \sim 1.5x/D$. 主轴射流宽度先是减少,轴变换后又逐步增加,次轴则一直增长,但随着 x 的增加,其增幅逐步减少,最后与主轴接近.当 $x/D > 4$ 时,主次轴射流扩展基本为直线.

2.4 射流动量平衡

由 LIF 的流动图像观察可知, DBV 射流横断面的形状由椭圆形变为圆形.假设其断面流速分布的等值线为一组相似椭圆,通过横断面内的超值动量积分,对 DBV 射流的动量通量平衡作了校核.如图 5 所示,在 $x/D > 5$ 后,动量沿程基本保持不变.

2.5 射流卷吸

任意断面的平均稀释度即为在该断面的射流总体积通量与初始体积通量之比,即 $\bar{S} = Q/Q_0$.图 6 为具有相同流量和相同名义直径(即喷嘴入口处管道直径)的圆射流和 DBV 射流的沿程平均稀释度比较.由于质量通量和动量通量的计算采用了断面流速分布等值线为一组相似椭圆的假设,并且这些断面处的流速分布呈现很好的相似性,因此 $x/D = 0.1$ 的数据点由于没有满足上述两个条件而未在图 6 中列出.从图 6 可见,两种射流的平均稀释度具有沿程线性性扩展的规律, DBV 射流的卷吸量显著大于圆射流.通过简单的量纲分析,以上结论就可表示成更通用的形式^[7 8]

$$\bar{S} \frac{R}{1-R} = k \frac{x}{l_m}$$

其中 k 为比例常数.由试验数据所得到的 DBV 射流的 k 值为 0.149.

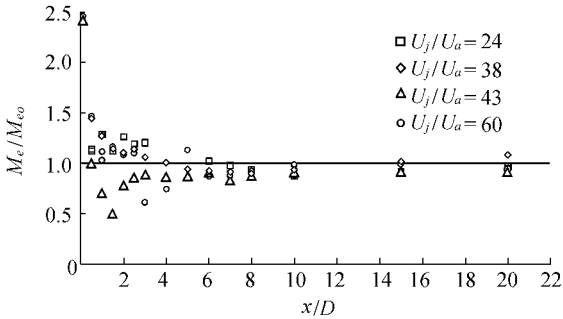


图 5 沿程超值动量通量

Fig.5 Excess momentum flux along downstream distance

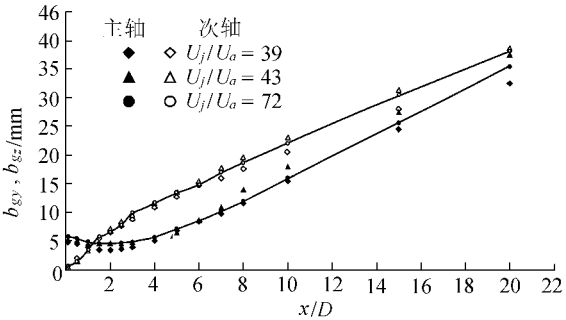


图 4 射流半宽沿纵轴线变化

Fig.4 Half-width of velocity profile vs. downstream distance along major and minor axis

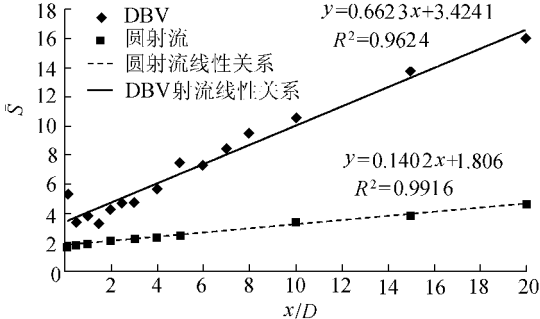


图 6 圆射流和 DBV 射流的沿程平均稀释度比较

Fig.6 Comparison of dilution between DBV jet and round jet along downstream distance

3 结 论

- a. DBV 射流中心线流速衰减分为 3 个区域 ,即核心区、特征区和充分发展区 ,每个区有特定的指数衰减规律.
- b. “ 轴变换 ”发生的位置为 $1x/D$ 至 $1.5x/D$.
- c. 当 $x/D > 1.5$ 时 ,除主轴平面内的紊动应力以外 ,时均流速及其他紊动参量具有自模性.
- d. 在相同的排放流量条件下 ,DBV 射流较圆射流具有更好的稀释特性.
- e. 各紊动参量的相似存在先后次序 ,在有些工况中 ,紊动强度要较时均流速滞后一段距离才出现相似 ,而雷诺应力又较紊动强度滞后一段距离才出现相似.

参考文献 :

[1] LEE J H W ,KARANDIKAR J ,HORTON P R. Hydraulics of “ duckbill ” elastomer check valves[J]. Journal of Hydraulic Engineering , ASCE ,1998 ,124 :394—405.

[2] LEE J H W ,WILKINSON D L ,WOOD I R. On the head-discharge relation of a duckbill elastomer check valve[J]. Journal of Hydraulic Research 2001 ,39(6) :619—627.

[3] 唐洪武 ,李行伟 .鸭嘴阀扩散器紊动射流特性试验研究[J]. 水科学进展 2001 ,12(2) :153—159.

[4] KROTHAPALLI A ,BAGANOFF D ,KARAMCHETI K. On the mixing of a rectangular jet[J]. Journal of Fluid Mech ,1981 ,107 :201—220.

[5] HO C M ,GUTMARK E. Vortex induction and mass entrainment in a small-aspect-ratio elliptic jet[J]. J Fluid Mech ,1987 ,107 :383—405.

[6] LOZANOVA M ,STANKOV P. Experimental investigation on the similarity of a 3D rectangular turbulent jet[J]. Experiments in Fluids , 1998 ,24 :470—478.

[7] CHU P C K. Mixing of turbulent advected line puffs[D]. Hong Kong : The University of Hong Kong ,1996.

[8] TONG Kei-wan. Hydraulics of a duckbill valve jet[D]. Hong Kong : The University of Hong Kong 2002.

Mass entrainment in a duckbill valve jet

GAO Zhu¹ , TANG Hong-wu¹ , JOSEPH H W LEE²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;
2. Department of Civil Engineering , The University of Hong Kong , Hong Kong , China)

Abstract :A series of experiments were performed to study the mixing characteristics of horizontal DBV jets in a coflow . Some parameters , including the mean velocity components , jet boundary , jet momentum , turbulence intensity , Reynold stress , and jet entrainment , were studied under different experimental conditions . The experimental results indicate that the decay of mean axial velocity can be divided into three regions , and each region has its own regularity of exponential decay . When $x/D > 1.5$, the mean velocity , turbulence intensity , and Reynold stress show the characteristic of self-similarity ; the axis switching occurs in the range of $x/D = 1-1.5$; there is a linear relationship between the average dilution and dimensionless downstream distance ; DBV jet has better effect of dilution as compared with the round jet of the same nominal diameter in coflows under the same volume of discharge .

Key words :turbulence jet ; Doppler laser velocimeter ; duckbill valve ; entrainment